

## 소각재를 이용한 건축외장재 제조

반효진\* · 박은주 · 이우근†

강원대학교 환경공학과 · \*한국건설기술연구원 건설환경연구실

(2008년 8월 26일 접수, 2009년 2월 27일 채택)

## Preparation of Multi-functional Brick Using MSWI Fly Ash

Hyo-Jin Ban\* · Eun-Zoo Park · Woo-Keun Lee†

Department of Environmental Engineering, Kangwon National University

\*Construction Environment Research Division, Korea Institute of Construction Technology

**ABSTRACT** : With the advance of industrialization and urbanization, a lot of waste has been discharged and treated by incineration. But fly and bottom ashes are generated in this process. In addition, the treatment method to recycle sewage sludge and melting slag is required to manage these wastes. The objective of this research was to prepare of multi-functional brick which were made from MSWI (Municipal solid wastes incinerator) fly ash, sewage sludge and slag. The bricks were made by mixing raw materials and then drying for 24 hours. Next, they were dried for 24 hours at 160℃ and fired for 2 hours. Calcination temperature was changed to discuss the effect of temperature from 1,080℃ to 1,130℃. Compressive strength of a brick was creased with the increase of temperature. To increase mixing ratio of fly ash and slag reduce the compressive strength the optimal condition was the mixing ratio of fly ash : melting slag : sewage sludge : clay as 10 : 20 : 5 : 65 and 1,150℃ of calcination temperature. Compressive strength was obtained as about 41 MPa at this condition.

**Key Words** : MSWI Fly Ash, Multi-functional Brick, Incineration, Sewage Sludge, Slag

**요약** : 본 연구에서는 소각재와 하수슬러지, 용융슬래그 등을 이용하여 기존의 벽돌을 대신 할 수 있는 건축외장재를 제조하고, 사용 재료의 혼합비와 소성온도 등 적정 제작 조건을 도출하고자 한다. 외장재 제조는 재료를 각 비율별로 성형하여 상온과 160℃에서 각각 24시간 동안 건조 후 1,080~1,130℃에서 2시간 동안 소성하였다. 소성한 다음 제조한 외장재 시편의 압축강도를 측정해 본 결과 소성온도가 증가할수록 압축강도는 증가하였으며, 소각재의 함유량이 적을수록, 용융슬래그의 함량이 증가할수록 압축강도가 증가하였다. 본 연구에서 도출된 외장재 제조 적정조건은 소각재 : 용융슬래그 : 하수슬러지 : 점토의 비율이 10 : 20 : 5 : 65로 제조된 시편을 1,115℃에서 소성한 시편의 압축강도가 41 MPa 이상으로 나타나 외장재로서의 사용이 가능한 것으로 나타났다. 또한 제조한 외장재의 중금속 용출실험결과 환경적으로 안전한 것으로 나타났다.

**주제어** : 소각비산재, 건축 외장재, 소각, 하수슬러지, 용융슬래그

### 1. 서론

정부의 생활폐기물 관리 정책이 매립에서 소각처리 후 최종매립으로 전환됨에 따라 소각시설과 이에 따른 소각재 발생량이 증가하고 있어 소각재의 처리가 또 다른 문제점으로 부각되고 있다. 생활폐기물 소각재의 발생량은 2006년 44만톤으로 이 중 소각바닥재가 37만톤, 소각비산재가 7만톤이다. 특히 소각비산재의 경우 다량의 유해중금속을 함유하고 있어 적정처리에 대한 연구가 시급한 실정이다.

소각재를 1,000~1,400℃의 조건에서 용융시켜 제조한 용융슬래그는 콘크리트 골재나 아스팔트 혼화재, 블록이나 벽돌 등으로 사용되고 있으나 적정 처리시 건축외장재로써 사용도 가능하다.<sup>1~3)</sup>

국내 발생하는 폐기물 중 하수슬러지의 발생량은 약 257만톤으로(2005년) 그 발생량은 매년 증가하고 있는 추세이다. 하수슬러지의 경우 현재 해양투기나 매립, 소각, 재활용 등의 방법으로 처리되고 있으나 2003년부터 하수슬러지의 직매립이 금지되었을 뿐만 아니라, 해양투기 또한 2011년부터는 금지될 예정이어서 최근 하수슬러지의 재활용에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.<sup>4,5)</sup>

소각비산재와 하수슬러지의 경우 소각비산재의 다공성과 하수슬러지의 높은 유기물 함량의 특성을 이용하여 흡착제, 경량골재 및 벽돌소재로 활용한 연구가 선행되었다.<sup>6,8)</sup>

최근 건축외장재에 심미적인 기능 외에도 다양한 기능을 추가하여 새로운 소재를 개발하는 연구가 진행되고 있다. 또한 자원순환을 목적으로 폐자원을 건축외장재 소재로 개발하는 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>9~12)</sup>

따라서 본 연구에서는 소각재, 용융슬래그 및 하수슬러지 등 폐자원을 이용하여 기존의 벽돌을 대신할 수 있는

† Corresponding author

E-mail: woklee@kangwon.ac.kr

Tel: 033-250-6355

Fax: 033-254-6357

건축외장재를 개발하고자 하였으며, 이를 위해 폐자원들의 혼합비와 소성온도 등 적정 제작 조건을 도출하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료

본 연구에 사용된 소각비산재(MSWI Fly ash; MF)는 A 자원회수시설에서 배출된 소각비산재를 사용하였으며, 소각 시설에 대한 개요는 Table 1에 나타났다. 본 연구에서 사용된 시료는 각 소각장의 집진장치 후단에서 포집된 상태에서 채취하였으며, 채취 후 105°C dry oven에서 24시간 이상 건조 후 사용하였다.

용융슬래그는 A소각장의 소각재를 로타리킬른에서 슬래그화 된 것을 채취하여 사용하였다. 하수슬러지는 C시 하수처리장에서 채취하였으며, 채취지점은 탈수 후 중력 벨트로 이동되는 슬러지케이크를 임의적으로 채취하여 실험실로 운반하여 냉장보관하며 사용하였다.

건축외장재로 제조하기 위해 소각비산재, 용융슬래그와 하수슬러지의 폐자원 외에 점토를 첨가하여 사용하였다. 본 실험에 사용한 점토는 실제 벽돌 제조 공장에서 사용하고 있는 배합된 점토를 채취하여 사용하였다.

사용된 재료의 XRF 분석 결과는 Table 2에 나타내었다. 소각비산재의 구성성분은 CaO 함량이 55.3 wt%로 가장 많은 부분을 차지하고 있었으며, 나머지 성분들은 미량 포함되어 있었다. 용융슬래그는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 31.9 wt%였으며, SiO<sub>2</sub> 함량이 29.9 wt%임을 확인할 수 있었다. 점토의 경우는 벽돌의 내구성에 영향을 미치는 구조물질인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 SiO<sub>2</sub>가 주성분임을 알 수 있었다.

**Table 1.** Introduction of target incineration plants

Site	Treatment Capacity			Equipment	
	ton/d	No.	Total	Incineration	Control facility
A	250	3	750	Stoker Rotary Kiln	SDA <sup>a</sup> , BF <sup>b</sup> , SCR <sup>c</sup>

SDA<sup>a</sup>: Spray Dry Absorber, BF<sup>b</sup>: Bag Filter,  
SCR<sup>c</sup>: Selective Catalytic Reduction

**Table 2.** Chemical composition of materials (Unit : wt%)

Elements	Sample	MF <sup>a</sup>	Slag <sup>b</sup>	Clay
SiO <sub>2</sub>		2.04	29.92	58.33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.74	9.04	24.22
CaO		55.30	17.51	5.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.81	31.9	2.86
K <sub>2</sub> O		3.66	1.00	1.44
TiO <sub>2</sub>		0.27	0.81	0.49
MnO		0.06	0.50	0.04
SO <sub>3</sub>		4.12	0.05	0.57
Na <sub>2</sub> O		7.72	3.30	1.52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.22	1.78	0.03
Total		74.94	95.77	94.93

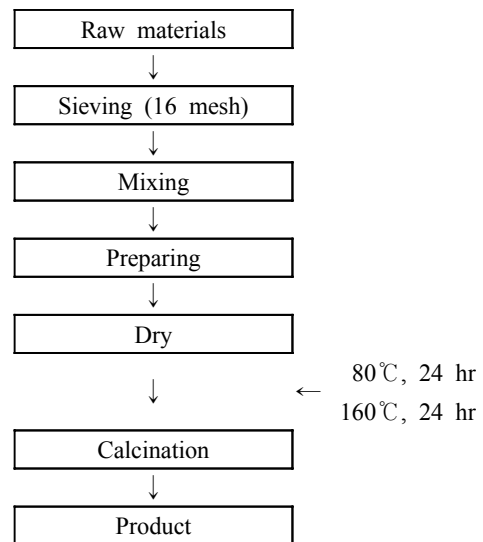
MF<sup>a</sup>: MSWI Fly ash, Slag<sup>b</sup>: melting slag

### 2.2. 실험방법

#### 2.2.1. 외장재 제조

실험방법은 점토벽돌을 제조하는 방식과 동일한 방법으로 외장재 시편을 제조하였으며, 제조방법은 Fig. 1에 나타내었다. 우선 소각비산재, 점토, 및 하수슬러지는 모두 105°C에서 24시간 이상 건조 후 16 mesh(<1.18 mm) 체로 체가름하여 사용하였으며, 용융슬래그는 따로 분쇄과정을 거치지 않고 16 mesh 체로 체가름한 다음에 사용하였다.

소각비산재, 점토 및 용융슬래그를 Table 3의 혼합비율대로 칭량한 다음 혼합기를 이용하여 약 1분 동안 잘 혼합한 뒤 물과 하수슬러지를 첨가하여 외장재의 배합토를 만들었다. 하수슬러지의 첨가량은 예비실험을 통하여 5 wt%로 고정하였고, 물은 배합토 총 무게의 10 wt% 내외로 넣어 혼합하였다. 배합토는 압축성형기에 넣고 100 kgf/cm<sup>2</sup>의 압력을 가하여 성형하였으며, 성형 후 24시간 동안 자연건조 시킨 다음 160°C에서 24시간 다시 건조한 외장재 시편을 1,080~1,115°C 범위에서 소성하였다.



**Fig. 1.** Schematic diagram for brick preparation.

**Table 3.** Mixture ratio by blending weight of testing materials (Unit: wt%)

MF	Slag	Sewage sludge	Clay
10	0	5	85
	10	5	75
	20	5	65
20	0	5	75
	10	5	65
	20	5	55
30	0	5	65
	10	5	55
	20	5	45
40	0	5	55
50	0	5	45

**Table 4.** Operation conditions of heat treatment (Calcination)

Temp.(°C)	1080, 1100, 1115, 1130
Time	2 hr
Heating rate	5 °C/min

2.2.2. 물리적 특성 분석

제조한 시편을 건축 외장재로서의 활용 가능성을 알아보 고자 시편의 내구성을 평가하기 위해서 만능시험기(Universal Testing Machine)를 이용하여 압축강도를 측정하였다.

2.2.3. 환경 안전성 평가

본 연구에서는 폐자원을 사용하였으므로, 이에 대한 환경 안정성을 검토하기 위해서 용출실험을 수행하였다. 시험방법은 폐기물공정시험법 제2장 제5항 용출시험방법(KSLT: Korea Standard Leaching Test)과 미국 EPA (Environmental protection Agency)가 지정한 방법인 TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure) 법을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 외장재 제조시 영향 인자 분석

제조한 시편의 건축외장재로서의 사용 가능성을 판단하고 그 제조 특성을 알아보기 위해서 소성 온도와 소각재 및 용융슬래그의 혼합비에 따른 영향을 살펴보았다.

3.1.1. 소성 온도에 따른 영향

소각재의 함유량을 10~30 wt%로 변화시키면서 용융슬래그 20 wt%, 하수슬러지 5 wt%, 점토 65~15% 비율로 만든 시편을 1,080~1,130°C에서 열처리하여 온도에 따른 강도에 대한 영향을 검토하였다(Table 5).

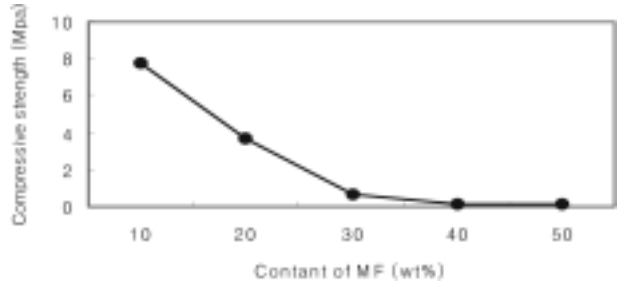
압축강도 측정 결과 1,080~1,100°C에서는 온도 증가에 따른 압축강도의 변화가 적었으나, 1,115°C에서는 강도가 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 1,130°C에서는 다시 압축강도가 감소하는 경향이 나타났다. 이는 1,115°C 부근에서 소결작용이 일어나 조직이 치밀화되어 압축강도는 증가하는 것으로 판단되며, 1,130°C 이상에서는 melting 현상이 일어나 압축강도가 다시 감소하는 것으로 생각된다.

3.1.2. 혼합 비율에 따른 영향 검토

외장재의 제조과정에서 소각재, 하수슬러지, 용융슬래그와 점토의 혼합비에 따른 외장재의 특성을 살펴보았다.

**Table 5.** Effect of temperature on the compressive strength of MSWI Fly ash (Unit: MPa)

MF (wt%)	Temp. (°C)			
	1080	1100	1115	1130
10	15.3	16.6	40.8	13.9
20	7.5	10.4	18.5	5.7
30	4.9	7.7	14.6	13.4



**Fig. 2.** Effect of MF mixing ratio on the compressive strength.

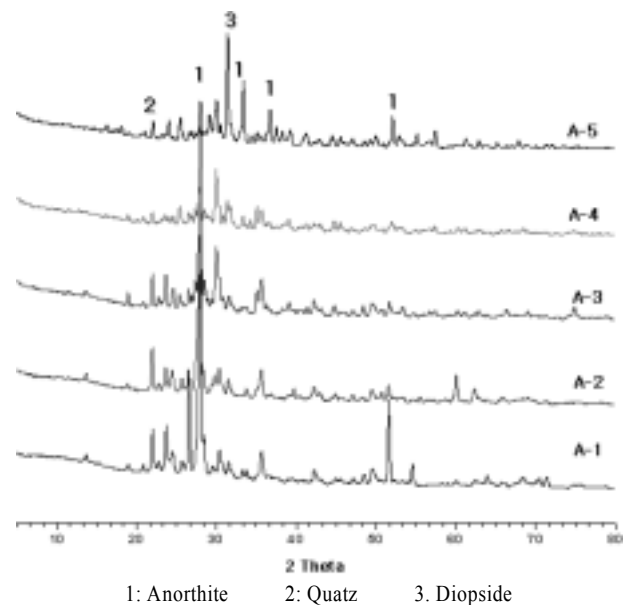
예비실험을 통해 하수슬러지의 함량은 5 wt%로 고정하고 소각재의 혼합비율을 10~50 wt%로 변경시켜가면서 앞에서 압축강도가 가장 높게 나타났던 1,115°C에서 소성하여 제조한 외장재의 압축강도를 Fig. 2에 나타냈다.

Fig. 2에 따르면 소각재의 함유량이 증가할수록 압축강도는 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 소각재 함유량이 증가할수록 외장재 내의 CaO의 함량이 증가하는 반면, 외장재의 골격을 구성하는 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함량이 감소하여 압축강도가 감소하는 것으로 판단된다.

이들 혼합비의 변화에 따른 광물학적 변화를 알아보기 위해 XRD분석을 수행한 결과(Fig. 3), 제조한 외장재의 주 성분은 Anorthite로 나타났다. 이는 소각재의 함유량이 많아 질수록 증가하고 있는 것으로 나타났다. 반면 Quartz는 점토의 함유량이 많을수록 증가하고 있는 것으로 나타났다.

또한 Diopside는 유리화된 상태에서 검출되는 물질로 소각재와 점토의 성분이 소성 과정동안 유리화 반응이 진행된 것으로 보인다. 이는 소각재 함유량이 증가할수록 peak의 intensity가 점점 더 크게 나타나고 있어, 유리화 반응에 소각재의 영향이 크다는 것을 알 수 있었다.

그러나 소각재와 점토만으로 외장재를 제조했을 때 압축강도가 8 MPa 이하로 외장재로서의 사용이 어려울 것



**Fig. 3.** XRD patterns according to MF mixing ratio.

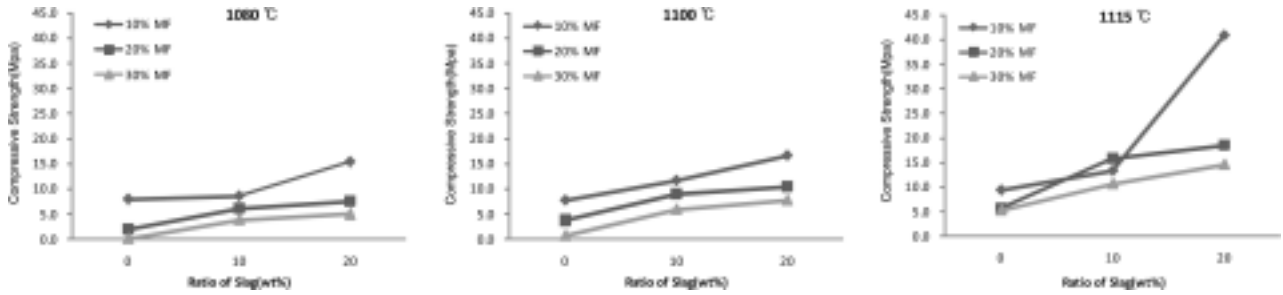


Fig. 4. Effect of mixing ratio of materials on the compressive strength.

로 판단되어, 소각재를 용융시켜 제조한 용융슬래그를 함유하여 외장재를 제조하였다. 소각재와 용융슬래그 함유량에 따른 압축강도의 변화는 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에 따르면 같은 온도에서 소각재의 함유량이 증가할수록 압축강도는 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 온도가 1,080°C에서 1,115°C로 변화함에 따라 같은 비율에서의 압축강도는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 앞의 온도별 변화에서와 같이 1,115°C에서 압축강도가 급격히 증가함을 알 수 있었다.

소각재의 함량이 증가함에 따라 구성성분의 변화로 인해 소성된 시편의 강도 변화가 있는 것으로 판단된다. 재료의 주성분인 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 소성시 용융 온도는 1,570~2,570°C 정도지만 이들을 적당한 비율로 혼합하면 그 비율에 따라 용융점이 변화하는 공융현상이 일어나, 혼합물의 용융점이 순수물질의 용융점보다 낮아진다. 점토 대신 첨가된 소각재의 양이 증가할수록 시편내의 SiO<sub>2</sub>나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 성분이 감소하고 대신 CaO의 함량이 증가하여 소성작용에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

용융슬래그는 각각의 소각재비율에서 용융슬래그의 함유량이 증가함에 따라 압축강도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 용융슬래그의 주성분인 SiO<sub>2</sub>와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 소결과정에서 소결체의 구조물질을 구성하는 성분으로 작용하기 때문이다. Lin은 MSWI slag와 점토를 가지고 벽돌을 만든 실험 결과 slag 함유량이 증가할수록 압축강도가 증가한다고 하였다. MSWI slag가 소성동안에 glass-ceramic으로 변해 강도가 증진된 것으로 이것은 MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>로 구성된 슬래그가 결정화 되는 것과 유사한 과정에서 생성된다.<sup>3)</sup> 본 연구에서 1,115°C에서 제조한 시편의 경우 용융슬래그가 함유된 경우 모두 10 MPa 이상의 압축강도를 발현하였다. 특히 소각재 10 wt%, 용융슬래그 20 wt% 함유한 시편의 경우 압축강도가 약 41 MPa로 나타나 국내 벽돌규정의 1급(20 MPa) 규정을 상회하는 값으로 외장재로서의 사용이 가능할 것으로 판단된다.

3.2. 환경 안정성 평가

제조한 외장재의 환경안정성을 확인하기 위해서 중금속 용출시험을 실시하여 그 결과를 Table 6과 7에 나타냈다. 먼저 KSLT법에 의한 결과에서 Pb의 경우 소각재 내에서 용출되었던 양의 약 1/1000 이하로 감소되어 모두 1 mg/L

를 초과하지 않았고, Cu와 Zn의 경우에서도 모두 1 mg/L 이하로 용출되었다.

TCLP법에 의한 중금속 용출실험은 KSLT에 비해 많은 중금속이 용출되었으나 Pb와 Cd 모두 규제치 이하의 값을 나타냈고, 초기 MF의 값에 비해 모두 현저히 감소되었다. 이는 소성 과정동안 중금속이 안정화된 것으로 판단된다. 또한 용융슬래그는 슬래그가 만들어 지는 동안 고온의 처

Table 6. Heavy metal concentrations in ashes and melting slag by leaching test (KSLT) (Unit: mg/L)

MF (wt%)	Slag (wt%)	Pb	Cu	Zn	Cd
10	0	0.09	0.07	N.D	
	10	0.23	0.24	N.D	N.D <sup>a</sup>
	20	0.23	0.29	0.01	
20	0	0.06	0.08	0.15	
	10	N.D	0.23	0.07	N.D
	20	0.26	1.60	0.06	
30	0	0.06	1.52	0.39	
	10	0.20	N.D	N.D	N.D
	20	0.17	N.D	N.D	
MF Raw <sup>b</sup>		29.47	0.12	20.51	N.D
Leaching standard		3.0	3.0	N.D	0.3

N.D<sup>a</sup>: Not detected

MF Raw<sup>b</sup>: MSWI fly ash raw materials

Table 7. Heavy metal concentrations in ashes and melting slag by leaching test (TCLP) (Unit: mg/L)

MF (wt%)	Slag (wt%)	Pb	Cu	Zn	Cd
10	0	1.07	0.08	0.15	N.D <sup>a</sup>
	10	0.22	0.36	0.03	
	20	0.24	0.16	0.05	
20	0	2.48	0.07	N.D	N.D
	10	0.25	0.32	0.02	
	20	0.21	0.29	0.01	
30	0	2.59	0.68	0.12	N.D
	10	0.22	0.30	0.01	
	20	0.24	0.18	0.01	
MF Raw <sup>b</sup>		29.05	0.13	2.859	N.D
Leaching standard		5.0	-	-	1.0

리과정에서 그 안에 존재하고 있던 중금속이 이미 안정화되어 있어 중금속 용출량이 적어 슬래그가 함유되지 않은 시편이 중금속 용출량이 훨씬 많은 것으로 판단된다.

국내 유해폐기물의 규정은 Pb와 Cu가 3.0 mg/L이고, Cd가 0.3 mg/L으로 위의 결과 모두 모두 규제치 이하로 나타나 소각재로 만든 외장재는 환경적으로 안정할 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

소각재와 하수슬러지 등 폐기물의 자원화 방안으로 외장재를 제조하고, 제조시 영향을 미치는 요인에 대한 검토 결과는 다음과 같다.

1) 소성온도에 따른 압축강도의 변화를 살펴본 결과, 소성온도가 증가할수록 압축강도는 증가하나 melting 온도 이상에서는 다시 감소하였다.

2) 소각재와 용융슬래그 함유량에 따른 영향을 살펴보면 소각재의 함량이 적을수록, 용융슬래그의 함량이 증가할수록 압축강도가 증가하였다.

3) 1,115℃에서 소성한 소각재 10 wt%, 용융슬래그 20 wt%, 하수슬러지 5 wt%를 함유한 시편의 압축강도는 약 41 MPa로 외장재로서의 사용이 가능한 것으로 판단되었다.

4) 제조한 외장재의 환경 안정성을 평가한 결과, 폐기물 내의 중금속들이 열처리 과정으로 인하여 안정화된 것을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 이성기, 배인국, 장영남, 채수천, 류경원, “도시 소각재 용융슬래그로부터 P형 제올라이트 합성,” 한국광물학회지, **19**(1), 7~14(2006).
2. 유영석, 신현철, 김범석, 최재일, 지재성, “소각재 용융슬래그의 결정화에 의한 고품질화 특성,” 한국폐기물학회지, **20**(7), 717~723(2003).

3. Lin, K.L., “Feasibility study of using brick made from municipal solid waste incinerator fly ash slag,” *J. Hazard. Mater.*, **B137**, 1810~1816(2006).
4. Chiou, I. J., Wang, K. S., Chen, C. H and Lin, Y. T., “Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash,” *Waste Management*, **26**, 1453~1461(2006).
5. Mun K. J., “Development and tests of lightweight aggregate using sewage sludge for nonstructural concrete,” *Construction and Building Materials*, **21**, 1583~1588(2007).
6. 권용준, 김유택, 이기강, 김영진, 강승구, 김정환, 박명식, “점토/소각재/첨가제계 인공 경량골재의 발포기구,” *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38**(9), 811~816(2001).
7. 문경주, 이민희, 소승영, 소양섭, “도시 쓰레기 소각 부산재를 이용한 비소성 인공골재의 제조,” *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **22**(9), 115~122(2006).
8. Saikia, N., Kato, S., and Kojima, T., “Production of cement clinkers from municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash,” *Waste Management*, **27**, 1178~1189(2007).
9. Aubert, J. E., Husson, B., and Sarramone, N., “Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement Part 2. Mechanical strength of mortars and environmental impact,” *J. Hazard. Mater.*, **146**, 12~19(2007).
10. Shngh, I. B., Chaturvedi, K., Morchhale, R. K., and Yegneswaran, A. H., “Thermal treatment of toxic metals of industrial hazardous wastes with fly ash and clay,” *J. Hazard. Mater.*, **141**, 215~222(2007).
11. Dondi, M., Ercolani, G., Guarini G., and Raimondo, M., “Orimulsion fly ash in clay bricks-Part 1: composition and thermal behaviour of ash,” *Journal of the European Ceramic Society*, **22**, 1729~1735(2002).
12. Kumar, S., “Fly ash-lime-phosphogypsum hollow blocks for walls and partitions,” *Building and Environment*, **38**, 291~295(2003).